文章编号:1000-4939(2023)04-0909-08

轻骨料混凝土单轴受压性能细观模拟

王公志[1],许斌[1,2],王江[1],赵冶[1],陈洪兵[3]

(1. 华侨大学土木工程学院,361021 厦门;2. 华侨大学福建省智慧基础设施与监测实验室,361021 厦门;
3. 清华大学土木工程系,100084 北京)

摘　要:从细观角度出发,将轻骨料混凝土看作由轻粗骨料、基体砂浆及两者间的界面过渡区组成的复合材料。采用塑性损伤本构模型,建立了含 3 种等效粒径的轻骨料混凝土二维数值模型,对其在单轴受压条件下破坏时的损伤分布和宏观应力-应变曲线关系进行了细观数值模拟。研究了不同轻粗骨料体积含量、表观密度、最大粒径及其随机分布对轻骨料混凝土单轴受压损伤分布及宏观应力-应变曲线关系的影响。结果表明,轻骨料混凝土受压破坏时轻粗骨料颗粒会破裂,轻粗骨料体积含量与表观密度对轻骨料混凝土力学性能的影响较大,轻粗骨料最大粒径对轻骨料混凝土单轴受压强度有轻微的影响,轻粗骨料的随机分布对轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线的非线性段有一定影响,且对损伤分布影响明显。

关键词:轻骨料混凝土;单轴受压;损伤分布;宏观应力-应变曲线;细观模拟

中图分类号:TU528.2　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.021

Mesoscopic simulation of the uniaxial compression behavior of lightweight aggregate concrete

WANG Gongzhi[1], XU Bin[1,2], WANG Jiang[1], ZHAO Ye[1], CHEN Hongbing[3]

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, 361021 Xiamen, China; 2. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province, Huaqiao University, 361021 Xiamen, China;
3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China)

Abstract: From a mesoscopic point of view, lightweight aggregate concrete (LWAC) is regarded as a composite material composed of light coarse aggregate (LCA), mortar matrix, and the interface transition zone (ITZ) between aggregates and mortar matrix. Meso-scale numerical model of LWAC composed of lightweight aggregates with three different equivalent dimensions was established and the behavior of LWAC under uniaxial compression load using plastic damage constitutive law was carried out. The uniaxial compression behavior in the form of damage distribution and the corresponding macro stress-strain relationship were investigated numerically. The effects of different light coarse aggregate content, apparent density, maximum size and random distribution on the damage distribution and macro stress-strain relationship were studied. Results show that the compression failure of LWAC causes the fracture of LCA. The content and

收稿日期:2021-11-20　　**修回日期**:2022-02-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51878305;51261120374;90715033)
通信作者:许斌,博士,教授。E-mail:binxu@hqu.edu.cn
引用格式:王公志,许斌,王江,等. 轻骨料混凝土单轴受压性能细观模拟[J]. 应用力学学报,2023,40(4):909-916.
WANG Gongzhi, XU Bin, WANG Jiang, et al. Mesoscopic simulation of the uniaxial compression behavior of lightweight aggregate concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(4):909-916.

apparent density of LCA have a great impact on the mechanical properties of LWAC. The maximum size of LCA has a mild effect on the uniaxial compressive strength of LWAC. The random distribution of LCA affects the nonlinear section of the uniaxial compressive stress-strain curve of LWAC and has obvious influence on the damage distribution.

Key words: lightweight aggregate concrete; uniaxial compression; damage distribution; macro stress-strain curve; mesoscopic simulation

轻骨料混凝土指由轻粗骨料、轻砂(或普通砂)、水泥和水配制而成的干表观密度不大于1 950 kg/m^{3}的混凝土,具有轻质环保、隔热保温、耐火抗冻等优点,在越来越多的工程结构中(如桥梁及高层建筑等)得到应用[1]。对于普通混凝土,骨料和砂浆之间的界面过渡区最薄弱,因此普通混凝土在拉压受力状态下裂缝的开展通常始于界面。而对于轻骨料混凝土,由于轻骨料的强度通常小于砂浆强度,即轻骨料混凝土通常发生轻骨料破坏。

近年来,国内外学者对轻骨料混凝土力学性能开展了大量的研究。王立成等[2]通过对硅灰轻骨料混凝土立方体试块进行了多次海水中的冻融试验,研究了硅灰对轻骨料混凝土抗海水冻融性能的影响,结果表明掺加硅灰能显著提高轻骨料混凝土的抗冻性能。CHOI 等[3]通过直接拉伸试验研究了不同轻骨料最大粒径及不同试件尺寸的轻骨料混凝土力学性能,结果表明轻骨料混凝土具有明显的尺寸效应,且拉伸强度受最大粒径的影响较小。CUI 等[4]通过试验研究了轻骨料体积含量及轻骨料性能对轻骨料混凝土力学性能的影响,指出轻骨料的体积含量、骨料形状、表观密度等对轻骨料混凝土力学性能有明显的影响。但这些研究均是基于轻骨料混凝土宏观层次进行的,从细观尺度上了解轻骨料混凝土中轻骨料对其宏观力学性能的影响以及对其细观破坏特征的影响具有重要意义。

近年来,计算机硬件水平的发展与混凝土本构模型的日益完善,为开展混凝土力学性能的细观模拟提供了必要手段。CHEN 等[5]采用细观尺度数值模拟方法,结合塑性损伤本构关系,研究了静态加载下混凝土的力学性能,揭示了粗骨料形状与随机分布等对混凝土力学性能的影响机制;王江等[6]基于混凝土细观建模,采用弹性损伤本构关系,研究了粗骨料形状与随机分布对混凝土受拉性能的影响;JIN 等[7]采用塑性损伤模型,在细观层次上研究了最大骨料粒径对混凝土单轴受压性能及其尺寸效应的影响,结果表明随着最大骨料粒径的增大,混凝土单轴受压强度会有所减小,且其尺寸效应会更加明显。

对于轻骨料混凝土在细观层次上力学性能的研究,KE 等[8]通过试验对5种不同类型的轻骨料混凝土进行单轴受压力学性能研究,并采用细观力学方法对轻骨料混凝土的破坏强度进行了识别,且识别结果与试验结果吻合较好。牛建刚等[9]从细观结构上研究了塑钢纤维掺量对轻骨料混凝土受压力学性能的影响,结果表明塑钢纤维的掺入,轻骨料混凝土的抗压强度会有所提高。金浏等[10]采用塑性损伤本构模型,在细观尺度上研究了轻骨料混凝土与普通混凝土压缩行为与劈裂行为及尺寸效应的异同。关于轻粗骨料本身对轻骨料混凝土在静态加载下损伤分布与应力-应变曲线影响的认识还不足,有待进一步研究。

本研究采用细观尺度混凝土数值模型建模方法,建立轻骨料混凝土二维数值模型,在与已有试验吻合良好的基础上,研究轻粗骨料体积含量、表观密度、最大粒径及随机分布对轻骨料混凝土的损伤分布及宏观应力-应变关系曲线的影响规律。

1 轻骨料混凝土细观数值模型建立与验证

1.1 轻骨料混凝土细观数值模型的建立

混凝土力学性能的非线性根源于其细观组成的非均质性[11],轻骨料混凝土可以看作由轻粗骨料、基体砂浆及界面过渡区组成的三相复合材料。本研究基于蒙特卡罗法,采用映射网格法[12]建立了尺寸为100 mm × 100 mm的平面轻骨料混凝土数值模型,轻粗骨料体积含量约为40%,模型示意图如图1所示。本研究采用ABAQUS中的静力通用分析步,

模型底部约束其竖向位移，底部中点约束其水平和竖向位移，在模型顶部施加恒定位移荷载。

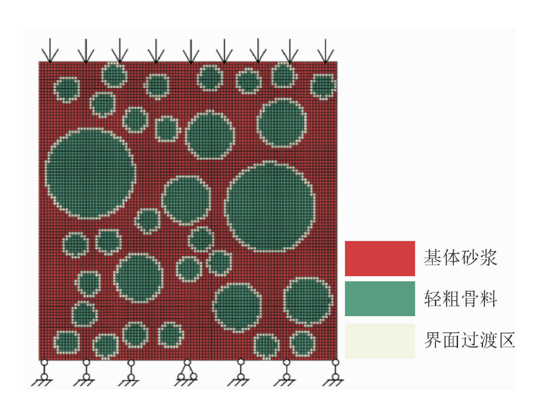


图 1　轻骨料混凝土细观数值模型示意图

Fig. 1　Schematic diagram of mesoscopic numerical model of LWAC

本研究采用的轻骨料混凝土等效粒径有 3 种，分别为 30(20 或 40)、16、8 mm，假定骨料形状为圆形。骨料分布采用 FULLER 提出的理想级配曲线[12]，公式为

$$P(D < D_0) = 100\% \times \sqrt{\frac{D_0}{D_{max}}} \tag{1}$$

式中：P 为粒径小于等于 D_0 的骨料颗粒累积的体积分数；D_0 为筛孔直径；D_{max} 为骨料的最大粒径。

但 Fuller 级配曲线理论多适用于三维混凝土模型，文献[13]通过以下转换公式将三维级配转化为二维级配，同时保证了两者转化的等效性。

$$P(D < D_0) = P_k(1.065D_0^{0.5}D_{max}^{-0.5} - 0.053D_0^4D_{max}^{-4} - 0.012D_0^6D_{max}^{-6} - 0.0045D_0^8D_{max}^{-8} + 0.0025D_0^{10}D_{max}^{-10}) \tag{2}$$

其中，P_k 为骨料(包括粗骨料和细骨料)占混凝土总体积的百分比，通常取 75%，粗骨料体积含量约为 47%。

界面过渡区是骨料与基体砂浆之间的等厚薄层区域，其厚度一般取为 20～50 μm，若按照实际尺寸建模，会导致计算量过大和计算效率低，已有研究表明界面过渡区厚度在 0.5～2 mm 范围内，对混凝土力学性能的影响较小[14-15]，因此本研究中界面过渡区厚度设定为 1 mm。采用 CPS4R 即四节点双线性平面应力四边形单元划分网格，以达到减缩积分、沙漏控制、提高计算率的效果，网格尺寸为 1 mm[5,10]。

1.2　本构关系

混凝土塑性损伤本构模型(CDP)最先由 LUBLINER 等[16]提出，随后 LEE 等[17]对其进行了改进，已经被广泛地应用到混凝土的细观数值模拟中。由于基体砂浆和界面过渡区的力学行为与混凝土类似[18]，因此文中基体砂浆和界面过渡区采用塑性损伤本构模型来描述其力学行为。轻骨料混凝土的骨料密度小且强度低，容易产生破坏，参考金浏等[19]的工作，本研究采用塑性损伤本构模型来描述。

塑性损伤本构模型认为压碎和拉裂是混凝土等脆性材料的两种破坏方式，破坏面主要由等效塑性压应变和等效塑性拉应变两个强化参数确定。其应力-应变可表达为

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \tag{3}$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \tag{4}$$

式中：σ_c 为压应力；σ_t 为拉应力；ε_c 为压应变；ε_t 为拉应变；E_0 为初始弹性模量；d_c 为受压损伤因子；d_t 为受拉损伤因子，其值为 0 时表示未损伤，而为 1 时表示完全破坏；$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ 为受压塑性应变张量；$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ 为受拉塑性应变张量。受压损伤因子和受拉损伤因子采用文献[20]提出的能量等效性假设，可按下式计算。

$$d_c = 1 - \sqrt{\sigma_c/(E_0\varepsilon_c)} \tag{5}$$

$$d_t = 1 - \sqrt{\sigma_t/(E_0\varepsilon_t)} \tag{6}$$

1.3　细观数值模型验证

就轻粗骨料而言，其力学性能如抗压强度、抗拉强度与弹性模量等不易直接测量，本研究采用文献[8]中的回归公式来表征轻粗骨料强度与堆积密度之间的关系，即

$$f_c = 41(\rho_{av}/1\,000 - 0.33) \tag{7}$$

$$f_t = 3.9(1.82\rho_{av}/1\,000 - 0.40) \tag{8}$$

式中 ρ_{av} 为轻粗骨料的堆积密度。

轻粗骨料弹性模量采用文献[9]中的公式来描述，即

$$E = 0.008\rho^2 \tag{9}$$

式中 ρ 为轻粗骨料的表观密度。

水灰比是影响基体砂浆力学性能的关键因素，砂浆的力学参数参考文献[21]中的回归分析公式，即

$$c/w = 0.047f_{cm} + 0.5 \tag{10}$$

$$E = 1\,000[7.7\ln f_{cm} - 5.5] \tag{11}$$

式中：c/w 为水灰比的倒数；f_{cm} 为基体砂浆的抗压强度；E 为基体砂浆的弹性模量；基体砂浆的受拉强度取受压强度的 1/10。

为了验证细观数值模型的正确性,借助式(7)~(11)得到相应细观组分的力学参数,如表 1 所示。采用表 1 中轻骨料混凝土的细观组分力学参数进行细观模拟试验,进而得到名义应力(细观模型底部反力与细观模型底部横向面积的比值)与名义应变(细观模型顶部竖向位移与细观模型高度的比值),与文献[2]的试验结果进行对比分析。

表 1　轻骨料混凝土细观组分力学参数

Tab. 1　Mechanical parameters of mesoscale components of LWAC

力学参数	轻粗骨料(LCA)	基体砂浆	界面过渡区(ITZ)
受压强度/MPa	15^	27^	21.6 ***
受拉强度/MPa	3.2^	2.7^	2.16 ***
密度/(kg · m^{-3})	1 300^	2 400 **	2 300 **
弹性模量/GPa	14^	20^	16 ***
泊松比	0.22 *	0.2 **	0.2 **
膨胀角/(°)	30 **	18 *	15 *

注: * 取自文献[10];^ 取自文献[2];** 取自文献[5];*** 为反复试算参数。

表 1 中 *** 标记的为反复试算参数,具体做法是将界面过渡区的力学参数看作由基体砂浆的力学参数进行不同程度的折减,然后对轻骨料混凝土细观模型进行多次压缩试验,直到与试验结果吻合较好。从图 2 可以看出,模拟结果和试验结果的应力-应变曲线吻合良好,试验的峰值应力为 21.9 MPa,数值模拟结果的峰值应力为 21.8 MPa,误差在 5% 以内,峰值应变亦是如此,仅下降段曲线略有差别。从而验证了细观数值模拟方法的可行性和力学参数选取的合理性。

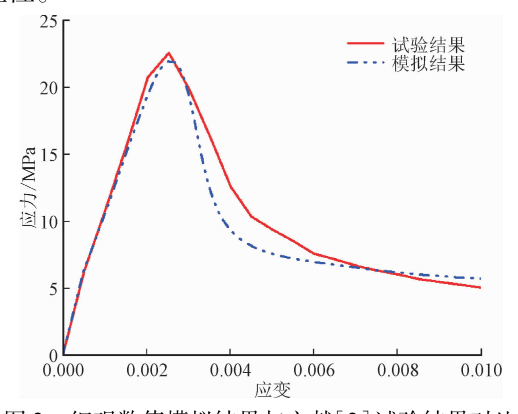


图 2　细观数值模拟结果与文献[2]试验结果对比

Fig. 2　Comparison ofmeso-scale numerical simulation result with experimental result in Ref. [2]

1.4　轻骨料混凝土单轴受压破坏行为

轻骨料混凝土单轴受压破坏行为是研究轻骨料混凝土力学性能中最基本且重要的一部分,本节以轻粗骨料体积含量为 40%、最大粒径为 30 mm 且表观密度为 1 300 kg/m^3 为例,探讨轻骨料混凝土在单轴受压条件下的损伤扩展以及机理分析等。

图 3 是轻骨料混凝土在单轴受压条件下的损伤分布演化图。可以看出,在加载初期,试件底部最先产生损伤且微裂纹首先起始于轻粗骨料,说明此处是试件内部最薄弱的区域,如图 3(a)所示;随着荷载的增加,裂纹开始斜向上发育且互相连接,并穿过基体砂浆,直至达到峰值应力,形成贯通的剪切斜裂缝,如图 3(b)~(c)所示;达到峰值应力后,随着荷载的增加,试件承载力迅速下降,直至试件失去承载能力,如图 3(d)所示。

与普通混凝土不同,轻骨料混凝土中轻粗骨料的抗压强度与弹性模量均小于基体砂浆和界面过渡区的抗压强度与弹性模量,在受到竖向荷载作用时,积聚了大量能量,当试件内部产生微裂纹时,积聚的能量瞬间释放,造成轻粗骨料开裂,最后裂缝贯穿试件。

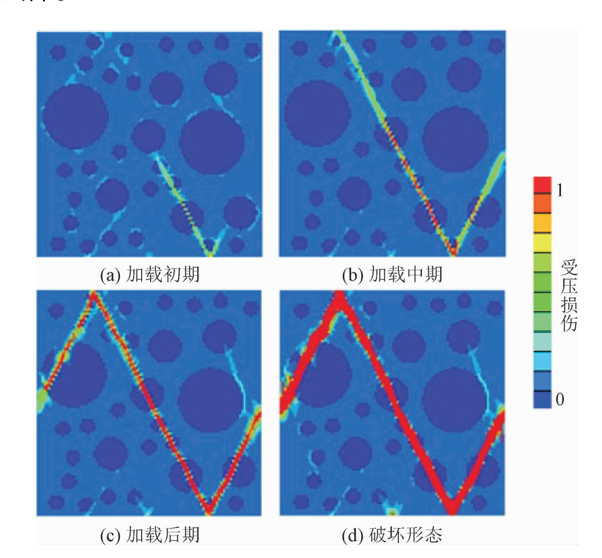


图 3　轻骨料混凝土单轴受压损伤过程

Fig. 3　Damage process of LWAC under uniaxial compression

2　轻骨料混凝土细观参数的影响分析

2.1　轻粗骨料体积含量的影响

当研究轻粗骨料体积含量对轻骨料混凝土受压性能的影响时,根据式(1)和式(2),可得到不同轻粗骨料体积含量的细观模型中轻粗骨料数量,如表 2 所示。

表 2　不同轻粗骨料体积含量的细观模型中轻粗骨料数量

Tab. 2　The quantity of LCA in mesoscopic models with different LCA volume content

轻粗骨料体积含量/%	等效骨料粒径/mm		
	30	16	8
30	1	5	20
40	2	6	24
50	3	7	28

根据表 2 建立了 3 种相同级配但不同轻粗骨料体积含量的随机骨料模型，如图 4 所示。

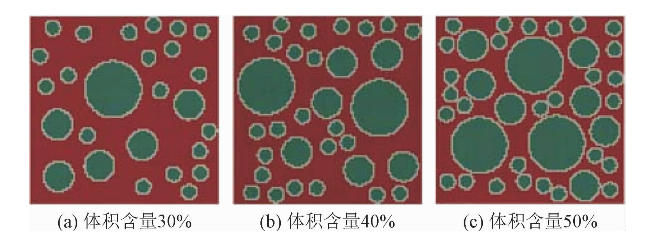


图 4　不同轻粗骨料体积含量的细观模型

Fig. 4　Mesoscopic model with different LCA volume content

2.1.1　对损伤分布的影响

对于不同轻粗骨料体积含量的轻骨料混凝土细观模型，单轴受压损伤分布图如图 5 所示。可以看出，所有细观模型的主裂缝带呈斜向分布，与细观模型边界所成的角度约为 40°～60°，形成剪切破坏面，最终贯穿整个细观模型；由于轻粗骨料分布的随机性，不同细观模型的损伤分布也具有一定的随机性。

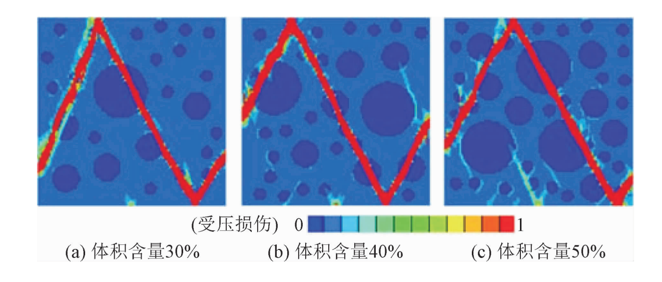


图 5　不同轻粗骨料体积含量的轻骨料混凝土损伤分布图

Fig. 5　Damage distribution of LWAC with different LCA volume content

2.1.2　单轴受压应力-应变曲线

图 6 为轻骨料混凝土在不同轻粗骨料体积含量下的宏观应力-应变曲线。可以看出，随着轻粗骨料体积含量的减少，轻骨料混凝土的峰值应力与上升段的斜率会有所增大，这是由于轻粗骨料的强度低于基体砂浆的强度，因此基体砂浆破坏所消耗的能量多于轻粗骨料破坏所消耗的能量。在轻粗骨料体积含量约为 30% 的细观模型中，轻粗骨料含量最少，基体砂浆所占的面积最大，则破坏所消耗的能量应最多，其对应的峰值应力也最大。即不同轻粗骨料体积含量对轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线的影响较大。

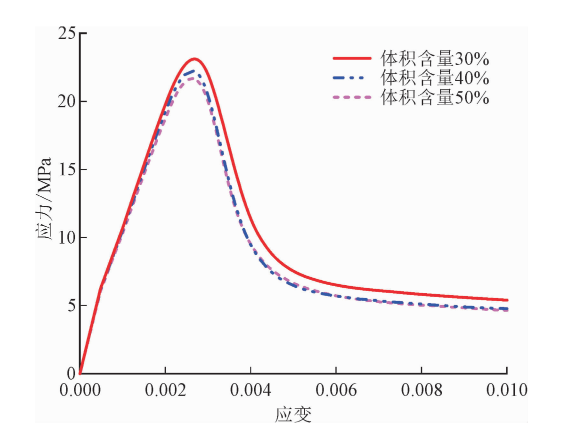


图 6　不同轻粗骨料体积含量的轻骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 6　Stress-strain curve of LWAC with different LCA volume content

2.2　轻粗骨料表观密度的影响

与普通混凝土不同，轻骨料混凝土的强度主要由轻骨料强度所决定，而轻骨料表观密度对轻骨料强度有重要影响。本节采用的细观模型与图 4 中轻粗骨料体积含量为 40% 的模型一致，以轻粗骨料表观密度为 790[22]、1 100[21]、1 300 kg/m^3[2,21-22] 为研究对象；3 种细观模型的基体砂浆和界面过渡区的力学参数保持一致，仅分析轻粗骨料表观密度对轻骨料混凝土细观损伤分布和应力-应变曲线的影响，通过式(7)～(9)，相应的轻粗骨料力学参数如表 3 所示。

表 3　轻粗骨料力学参数

Tab. 3　Mechanical parameters of LCA

轻粗骨料类型	表观密度/($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
800 级	790	5	6.5	1.9
1 100 级	1 100	9.68	12	2.7
1 300 级	1 300	14	15	3.2

2.2.1　对损伤分布的影响

图 7 为不同轻粗骨料表观密度的细观模型单轴受压损伤图，可以看出轻粗骨料的表观密度对单轴受压的细观损伤分布位置有一定影响，但 3 种模型的主裂缝方向基本一致；随着轻粗骨料表观密度的

增大,轻骨料混凝土的损伤区域会有所增大。

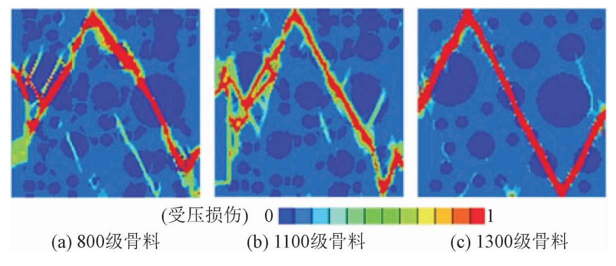


图7 不同轻粗骨料表观密度的轻骨料混凝土损伤分布图

Fig. 7 Damage distribution of LWAC with different LCA apparent density

2.2.2 单轴受压应力-应变曲线

不同轻粗骨料表观密度细观模型的宏观应力-应变曲线如图8所示。可以看出,各细观模型都有完整的弹性段和峰值点;随着轻粗骨料表观密度的增大,轻骨料混凝土的峰值应力、峰值应变与上升段的斜率都会相应地增大,但下降段的斜率也会有所减小,其中轻粗骨料表观密度为1 300 kg/m^{3}的峰值应力为21.8 MPa,弹性模量为10.8 GPa,1 100 kg/m^{3}的峰值应力与弹性模量分别为17.3 MPa、9.4 GPa,790 kg/m^{3}的峰值应力与弹性模量分别为10.7 MPa、7.5 GPa;可以看出,1300级轻骨料混凝土的峰值应力分别为1100级骨料与800级骨料的1.26倍与2倍,弹性模量分别为1100级骨料与800级骨料的1.15倍与1.44倍,因此可以通过提高轻粗骨料强度来提高轻骨料混凝土的单轴抗压强度与弹性模量。在轻粗骨料表观密度为790 kg/m^{3}的细观模型中,其轻粗骨料抗压强度最低,则破坏时所消耗的能量最少,从而导致其对应的轻骨料混凝土单轴抗压强度也最低。即不同轻粗骨料表观密度对轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线影响较大。

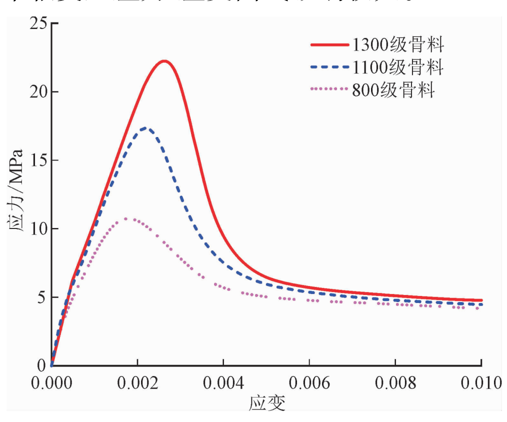


图8 不同轻粗骨料表观密度的轻骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of LWAC with different LCA apparent density

2.3 轻粗骨料最大粒径的影响

当研究轻粗骨料最大粒径对轻骨料混凝土受压性能的影响时,因骨料随机分布的特性,无法保证细观模型中等效粒径为16 mm与8 mm的骨料位置一致,仅保持细观模型中等效粒径为16 mm与8 mm的骨料数量不变,根据式(1)和式(2),计算得到不同细观模型中轻粗骨料最大粒径的骨料数量,如表4所示。

表4 不同轻粗骨料最大粒径的细观模型中最大骨料数量

Tab. 4 The quantity of the biggest aggregates in mesoscopic model with different maximum size of LCA

最大粒径/mm	20	30	40
最大骨料数量	4	2	1

根据表2和表4建立了3种相同轻粗骨料体积含量但不同最大粒径的随机骨料模型,如图9所示。

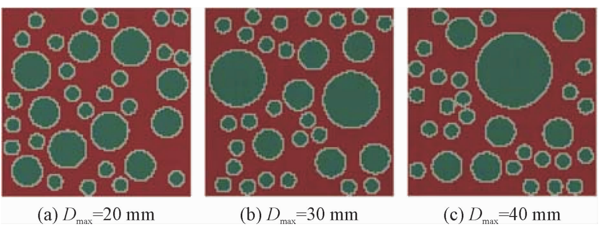


图9 不同轻粗骨料最大粒径的细观模型

Fig. 9 Mesoscopic model with different LCA maximum size

2.3.1 对损伤分布的影响

不同轻粗骨料最大粒径的轻骨料混凝土单轴受压损伤分布图如图10所示。可以发现,轻粗骨料最大粒径对轻骨料混凝土受压破坏的最终模式影响不大,各细观模型的主裂缝带与细观模型边界所成的角度约为45°,开裂方式基本一致,但损伤分布的具体位置有一定差异。

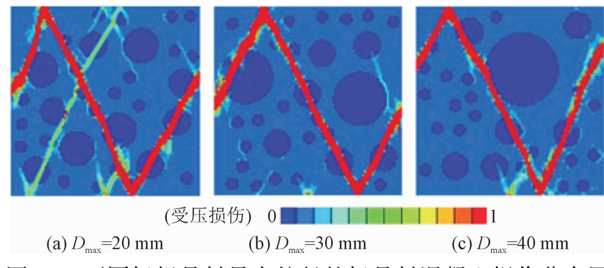


图10 不同轻粗骨料最大粒径的轻骨料混凝土损伤分布图

Fig. 10 Damage distribution of LWAC with different LCA maximum size

2.3.2 单轴受压应力-应变曲线

图11为不同轻粗骨料最大粒径的轻骨料混凝土在单轴受压条件下的应力-应变曲线。可以看出,在相同轻粗骨料体积含量下,各细观模型的应力-应变曲线重合度较高;随着最大粒径的增大,轻骨料混凝土单轴受压峰值应力会轻微的减小。主要是因为提高轻粗骨料最大粒径,减少了模型内的轻粗骨料

数量，使得界面过渡区面积减小，损伤裂纹间的黏聚力和桥接能力降低，从而会降低轻骨料混凝土强度。即最大粒径对轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线有轻微的影响。

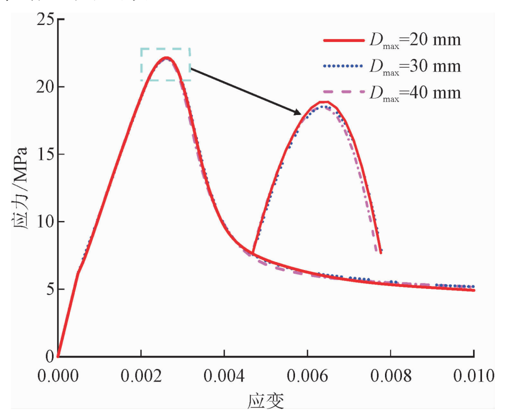


图 11　不同轻粗骨料最大粒径的轻骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 11　Stress-strain curve of LWAC with different LCA maximum size

2.4　轻粗骨料随机分布的影响

为研究轻粗骨料随机分布对轻骨料混凝土单轴受压力学性能的影响，本研究建立了 3 组相同级配与相同轻粗骨料体积含量，但不同位置分布的细观数值模型，如图 12 所示。

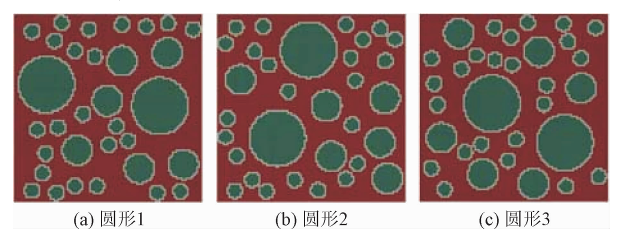


图 12　不同轻粗骨料位置的细观模型

Fig. 12　Mesoscopic model with different LCA location

2.4.1　对损伤分布的影响

图 13 为轻粗骨料随机分布的细观模型单轴受压损伤分布图。可以看出，3 组细观模型的开裂方式基本一致，为典型的剪切破坏，因轻骨料混凝土细观组成的非均质性，细观模型中主要裂缝的分布随轻粗骨料位置的改变有一定差别。

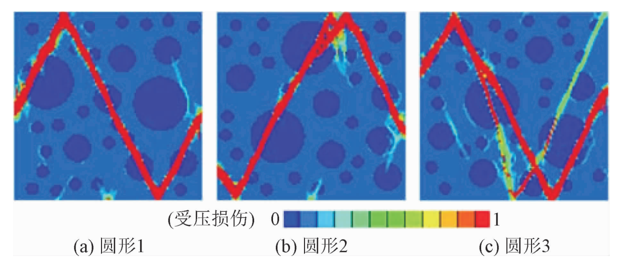


图 13　不同轻粗骨料位置的轻骨料混凝土损伤分布图

Fig. 13　Damage distribution of LWAC with different LCA location

2.4.2　单轴受压应力-应变曲线

轻骨料混凝土在轻粗骨料随机分布下的单轴受压应力-应变曲线如图 14 所示。从图中可以看出，上升段曲线完全重合，但下降段有所差别，且峰值应力和峰值应变差别较小，这是因为轻粗骨料的随机分布会影响轻骨料混凝土在单轴受压过程中穿过轻粗骨料的面积，由于轻粗骨料的强度低于基体砂浆的强度，且每个细观模型的损伤面积略有不同，因此轻骨料混凝土破坏时所消耗的能量会略有差别。即轻粗骨料的随机分布对轻骨料混凝土单轴受压应力-应变曲线有轻微的影响。

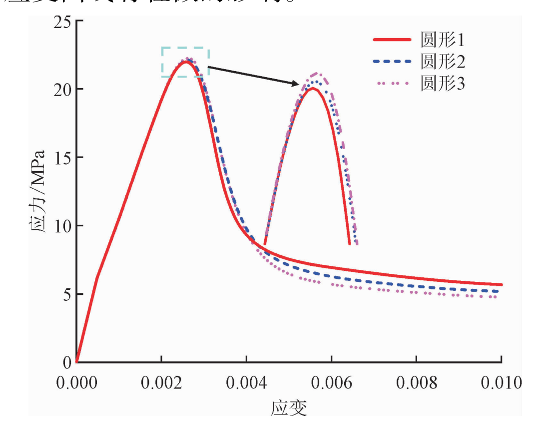


图 14　不同轻粗骨料位置的轻骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 14　Stress-strain curve of LWAC with different LCA location

3　结　论

本研究采用细观尺度数值模拟方法，考虑轻骨料混凝土细观组分的非均质性，采用混凝土塑性损伤本构关系，建立了轻骨料混凝土二维细观数值模型，研究了不同轻粗骨料体积含量、表观密度、最大粒径及其随机分布对轻骨料混凝土在单轴受压条件下的损伤分布以及应力-应变曲线的影响。主要结论如下。

1）细观模拟结果与试验结果吻合较好，细观数值模型能够较好地阐释试件的破坏机理。

2）在单轴受压条件下，轻粗骨料体积含量会影响轻骨料混凝土单轴抗压强度与弹性模量。轻粗骨料表观密度会影响轻粗骨料强度，从而对轻骨料混凝土力学性能产生影响，可以通过提高轻粗骨料强度来提高轻骨料混凝土强度与弹性模量，随着轻粗骨料表观密度的增大，轻骨料混凝土的损伤区域会有所增大，峰值强度与弹性模量也会有所增大。

3）轻骨料混凝土单轴受压强度随轻粗骨料最大

粒径的增大而略有减小,且损伤分布的位置有所差别。对于不同轻粗骨料分布的细观模型,峰值应力差别较小,但轻粗骨料的随机分布导致了混凝土材料与损伤分布的随机性,在应力-应变曲线的下降段略有差别。

需要说明的是,本研究暂未考虑孔隙对轻粗骨料弹性参数的影响,对此种工况将另行研究。

参考文献:

[1] 叶列平,孙海林,陆新征,等.高强轻骨料混凝土结构——性能、分析与计算[M].北京:科学出版社,2009.

[2] 王立成,刘汉勇,HIWADA K.硅灰对轻骨料混凝土抗海水冻融性能的影响[J].建筑材料学报,2005,8(4):349-355.
WANG Licheng, LIU Hanyong, HIWADA K. Influences of silica fume on the property of lightweight aggregate concrete with resistance to freezing and thawing cycles in seawater[J]. Journal of building materials,2005,8(4):349-355(in Chinese).

[3] CHOI S J, YANG K H, SIM J I, et al. Direct tensile strength of lightweight concrete with different specimen depths and aggregate sizes[J]. Construction and building materials,2014,63:132-141.

[4] CUI H Z, LO T Y, MEMON S A, et al. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete[J]. Construction and building materials, 2012, 35:149-158.

[5] CHEN H B, XU B, MO Y L, et al. Behavior of meso-scale heterogeneous concrete under uniaxial tensile and compressive loadings [J]. Construction and building materials,2018,178:418-431.

[6] 王江,许斌,陈洪兵.混凝土受拉性能多尺度均匀化数值模拟研究[J].应用力学学报,2019,36(3):538-546.
WANG Jiang, XU Bin, CHEN Hongbing. Numerical simulation of the tensile behavior of concrete using multi-scale homogenization approach[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(3):538-546(in Chinese).

[7] JIN L, YU W X, LI D, et al. Numerical and theoretical investigation on the size effect of concrete compressive strength considering the maximum aggregate size[J]. International journal of mechanical sciences,2021,192:106130.

[8] KE Y, ORTOLA S, BEAUCOUR A L, et al. Micro-stress analysis and identification of lightweight aggregate's failure strength by micromechanical modeling[J]. Mechanics of materials, 2014, 68:176-192.

[9] 牛建刚,杨溪原,徐泽华.基于细观结构塑钢纤维轻骨料混凝土受压力学性能数值模拟[J].建筑科学,2019,35(3):95-100.
NIU Jiangang, YANG Xiyuan, XU Zehua. Numerical simulation of mechanical properties of plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete based on microstructure[J]. Building science, 2019,35(3):95-100(in Chinese).

[10] 金浏,杨旺贤,余文轩,等.基于细观模拟的轻骨料混凝土破坏行为及尺寸效应研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(1):91-99.
JIN Liu, YANG Wangxian, YU Wenxuan, et al. Study on failure behavior and size effect of lightweight aggregate concrete based on meso-simulation[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering,2021,41(1):91-99(in Chinese).

[11] DU X L, JIN L, MA G W. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete[J]. International journal of damage mechanics,2013,22(5):617-642.

[12] OUYANG H, CHEN X W. 3D meso-scale modeling of concrete with a local background grid method[J]. Construction and building materials,2020,257:119382.

[13] 阮欣,李越,金泽人,等.混凝土二维细观骨料建模方法综述[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(5):604-612.
RUAN Xin, LI Yue, JIN Zeren, et al. Review of two-dimensionalmeso-modeling methods of concrete aggregate[J]. Journal of Tongji University(natural science),2018,46(5):604-612(in Chinese).

[14] JIN L, YU W X, DU X L, et al. Meso-scale simulations of size effect on concrete dynamic splitting tensile strength: Influence of aggregate content and maximum aggregate size[J]. Engineering fracture mechanics,2020,230:106979.

[15] SONG Z H, LU Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data[J]. International journal of impact engineering,2012,46:41-55.

[16] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International journal of solids and structures, 1989,25(3):299-326.

[17] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of engineering mechanics, 1998, 124(8):892-900.

[18] CHEN H B, XU B, WANG J, et al. Parametric analysis on compressive strain rate effect of concrete using mesoscale modeling approach[J]. Construction and building materials, 2020, 246:118375.

[19] 金浏,蒋轩昂,杜修力.轻骨料无腹筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应:细观模拟[J].工程力学,2020,37(7):57-67.
JIN Liu, JIANG Xuan'ang, DU Xiuli. Shear failure and size effect of lightweight aggregate concrete beams without web reinforcement: A meso-scale study[J]. Engineering mechanics,2020,37(7):57-67(in Chinese).

[20] SUN Y Z, FANG C Z, FAN D, et al. A research on fatigue damage constitutive equation of asphalt mixture[J]. Mathematical problems in engineering,2018,2018:3489082.

[21] 高利甲.自密实轻骨料混凝土力学性能数值模拟[D].湘潭:湖南科技大学,2011.

[22] 宋培晶,丁建彤,郭玉顺.高强轻骨料混凝土的收缩及其影响因素的研究[J].建筑材料学报,2004,7(2):138-144.
SONG Peijing, DING Jiantong, GUO Yushun. Shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete and factors influencing it [J]. Journal of building materials, 2004, 7(2): 138-144 (in Chinese).

(编辑 李坤璐)